ÜBER DEN WIRKUNGSGRAD BEI DER PHOSPHORESZENZERREGUNG DURCH KANALSTRAHLEN

INAUGURAL-DISSERTATION

VERFASST UND DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

KGL. BAYER. JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT AM 12. MAI 1914

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

VON

EDUARD RÜCHARDT

AUS MOSKAU.

LEIPZIG

JOHANN AMBROSIUS BARTH

1914

Referent: Geh. Hofrat Prof. Dr. Wilhelm Wien.

Metzger & Wittig, Leipzig.

MEINEN ELTERN

GEWIDMET

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549815_0157

I. Einleitung.

Die Phosphoreszenzerregung durch Kanalstrahlen ist bisher hauptsächlich zum Gegenstande qualitativer Untersuchungen gemacht worden. Als einzige mir bekannte Messung ist eine Arbeit von H. Baerwald[1]) zu nennen, die sich mit der Frage beschäftigt, ob eine spezifische phosphoreszenzerregende Wirkung der geladenen Teilchen im Kanalstrahl existiert. Baerwald findet in der Tat, daß die geladenen Teilchen wesentlich stärker Phosphoreszenz erregen als die neutralen. Dieser Befund ist in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen von W. Wien[2]) und mit der Auffassung von P. Lenard, nach der die Phosphoreszenz ein lichtelektrischer Vorgang ist.

Für das Studium der Phosphoreszenzerregung durch Kanalstrahlen erweisen sich die von P. Lenard angegebenen Erdalkaliphosphore als sehr gut geeignet. An diesen Körpern sind von P. Lenard und seinen Schülern die zum Teil sehr komplizierten Erscheinungen bei Licht- und Kathodenstrahlerregung untersucht worden.[3]) Da diese Arbeiten für die mitzuteilenden Experimente von Wichtigkeit sind, müssen einige Punkte hier erwähnt werden.

Lenard unterscheidet folgende drei Arten von Erregungsprozessen:

1. Der *m*-Prozeß ist der phosphoroskopisch schnell abklingende Momentanprozeß, der in der Hitze, dem oberen

---

1) H. Baerwald, Habilitationsschrift. Darmstadt u. Ann. d. Phys. **39.** p. 849—886. 1912.

2) W. Wien, Ann. d. Phys. **8.** p. 252—256. 1902.

3) P. Lenard u. V. Klatt, Wied. Ann. **38.** p. 90. 1889; Ann. d. Phys. **15.** p. 225—282. 1904; **15.** p. 425—484. 1904; **15.** p. 633—672. 1904; P. Lenard, Ann. d. Phys. **31.** p. 641—685. 1910; P. Lenard, mehrere Arbeiten in Heid. Ak.

Momentanzustand der Phosphoreszenzbande, allein noch übrig bleibt. Er ist identisch mit „Fluoreszenz".

2. Der *u*-Prozeß ist ein ebenfalls rasch, aber langsamer als der *m*-Prozeß abklingende „Ultraviolettprozeß". Er wird vorzugsweise durch kurzwelliges, ultraviolettes Licht, aber auch durch Kathoden- und Kanalstrahlen[1]) erregt.

3. Der *d*-Prozeß oder „Dauerprozeß" ist hauptsächlich durch Aufspeicherung von Lichtenergie und durch eine scharf ausgeprägte „Erregungsverteilung" charakterisiert. Die aufgespeicherte Energie konvergiert während der Erregung des Phosphors gegen einen Grenzwert. Bei genügend intensiver und langer Bestrahlung kann der Phosphor voll erregt werden. In der Kälte speichern die Dauerzentren nur Energie auf, bei mittleren Temperaturen beobachtet man Aufspeicherung und Leuchten nebeneinander, bei hohen Temperaturen endlich findet keine Aufspeicherung mehr statt.

Kathoden- und Kanalstrahlen erregen auch die Zentren langer Dauer, vermögen also eine Energieaufspeicherung herbeizuführen. Dies ist aber nur bei sehr intensiver Bestrahlung möglich. Kürzlich ist von P. Lenard die maximale Energie, die ein Bi-Atom in den Zentren der blauen CaBi-*a*-Bande aufspeichern kann, zu $18{,}4 \cdot 10^{-12}$ Erg bestimmt worden.[2])

Im Gegensatz zum Dauerprozeß ist bei der Erregung der Zentren kurzer Dauer eine derartige obere Grenze der Erregung nicht vorhanden. Hier ist vielmehr im allgemeinen eine Proportionalität zwischen erregender und erregter Intensität anzunehmen. Hierauf bezügliche Versuche sind von P. Lenard[3]) an langsamen, lichtelektrisch ausgelösten, sowie schnellen Kathodenstrahlen ausgeführt. Es zeigte sich, daß die Phosphoreszenzhelligkeit in weiten Grenzen der auftreffenden Strahlendichte und, bei gleicher Strahlendichte, der um eine bei verschiedenen Phosphoren verschiedene Konstante verminderten Energie proportional ist. Die Konstante entspricht dabei einer Grenzgeschwindigkeit der Strahlen, unterhalb derer keine oder verspätet auftretende und schwache

---

1) H. Baerwald, Habilitationsschrift p. 37 unten.

2) P. Lenard u. W. Hausser, Heidelb. Akad. 1913 A. 19. Abhandlung. Über die Bezeichnungen der Phosphore vgl. die Arbeiten von P. Lenard.

3) P. Lenard, Ann. d. Phys. **12.** p. 449—490. 1903.

Helligkeit des Phosphors beobachtet wurde.[1]) Die Messungen ergaben ferner eine nahezu vollständige Umsetzung der Energie langsamer Kathodenstrahlen in Phosphoreszenzlicht. Anders verhalten sich schnelle Kathodenstrahlen, wie sie in Entladungsröhren erzeugt werden (ca. $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit). Hier war der Wirkungsgrad wesentlich schlechter und betrug nur einige Prozente. Damit ist natürlich eine Abweichung von dem obigen Proportionalitätsgesetz gegeben, die übrigens nicht in ihrem Verlauf genauer untersucht ist. Ähnliches fand früher E. Wiedemann[2]) durch Messung der Erwärmung eines von Kathodenstrahlen getroffenen Phosphoreszenzschirmes. Es zeigte sich, daß mehr als 90 Proz. der ganzen Energie der Kathodenstrahlen in Wärme verwandelt wird.

Ähnlich dürften die Verhältnisse deshalb auch bei Kanalstrahlen liegen. Eine interessante Beobachtung von H. Baerwald[3]) deutet in der Tat darauf, daß die Phosphore im Kanalstrahl eine hohe Temperatur besitzen. Er findet, daß die verschiedenen Erdalkaliphosphore mit Banden von bekannter Temperaturabhängigkeit im Kanalstrahl mit der Farbe leuchten, die sie bei 300 bis 350° C. haben müßten. Danach muß auch bei Kanalstrahlenerregung ein großer Teil der Energie in Wärme umgesetzt werden. Indessen lassen andere Beobachtungen, auf die im folgenden eingegangen werden muß, einen sehr guten Wirkungsgrad bei der Phosphoreszenzerregung durch Kanalstrahlen erwarten.

II. Problemstellung.

H. v. Dechend und W. Hammer[4]) haben bei hohen Geschwindigkeiten und geringer Strahlendichte Szintillationen von Gieselschem Zinksulfid unter Kanalstrahlen beobachtet. Diese Szintillationen zeigten sich bei magnetischer Zerlegung der Kanalstrahlen sowohl im abgelenkten wie im nicht abgelenkten Phosphorenszenzfleck. Die Beobachtung von Szintillationen scheint nun einen Schluß über die Quelle der

1) P. Lenard u. S. Saeland, Ann. d. Phys. **28.** p. 485. 1909.
2) E. Wiedemann, Ann. d. Phys. **66.** p. 61. 1898.
3) H. Baerwald, l. c. p. 867.
4) H. v. Dechend u. W. Hammer, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. **12.** p. 531—532. 1910.

Energie bei der Phosphoreszenzerregung zuzulassen. Untersuchungen von J. v. Kries[1]) „über die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen" haben ergeben, daß grüne Strahlen, die nur kurze Zeit das Auge treffen, einen Lichteindruck hervorrufen können, wenn im ganzen eine Energie von 1,3 bis $2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg auf die Netzhaut des Auges gelangt. Nimmt man an, daß bei der Phosphoreszenzerregung durch Kanalstrahlen die erzeugte Lichtenergie ihre Quelle in der kinetischen Energie der Kanalstrahlen hat, so müßte die bei einer Szintillation in Licht umgesetzte Energie eines Kanalstrahlenteilchens demnach ausreichen, um $2 \cdot 10^{-10}$ Erg bei einem Augenabstand von ca. 8 cm und einem Pupillendurchmesser von ca. 0,8 cm (Dunkeladaption) ins Auge gelangen zu lassen. Augenabstand und Pupillenöffnung sind so gewählt, daß die Wahrnehmung einer einzelnen Szintillation gerade noch als möglich erscheint. Im ganzen müßte also von einer Szintillation als Phosphoreszenzlicht die Energie

$$\frac{4 \cdot 64\pi \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{1{,}6\,\pi} = 3{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ Erg}$$

ausgehen. Nun ist die kinetische Energie eines Wasserstoffatoms im Kanalstrahl bei einer Geschwindigkeit von $1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$:

$$\frac{1{,}6 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{16}}{2} = 0{,}8 \cdot 10^{-8} \text{ Erg.}$$

Es würde also auch im Falle einer vollständigen Umsetzung der Kanalstrahlenenergie in Phosphorenszenzlicht die Wahrnehmung von Szintillationen wenigstens unter den gewählten Bedingungen nicht möglich sein. Alerdings dürften die obigen Annahmen (8 cm Augenabstand und 8 mm Pupillendurchmesser) für die äußerste Grenze der Szintillationswahrnehmung bei Kanalstrahlen nicht zutreffen. Sie gelten erfahrungsgemäß annähernd bei den α-Strahlen. H. v. Dechend und W. Hammer beobachteten mit einem Mikroskop. Ein Wirkungsgrad nicht allzuviel kleiner als 1 würde also eine Wahrnehmung von Szintillationen noch sehr wohl möglich machen. Indessen ist auch ein so großer Wirkungsgrad nach den Erfahrungen an schnellen Kathodenstrahlen und den Beobachtungen von H. Baerwald über die Temperatur der Phosphore im Kanal-

1) J. v. Kries, Zeitschr. f. Sinnesphysiologie **41.** p. 373ff. 1907.

strahl nicht zu erwarten. — Es bliebe dann noch die Möglichkeit, die Quelle der Phosphoreszenzenergie in dem emittierenden Phosphoreszenzzentrum selbst zu suchen. Den Kanalstrahlen würde dann nur mehr eine auslösende Wirkung zukommen. Eine Entscheidung der Frage kann durch eine absolute Messung der erregenden Kanalstrahlenenergie und der erregten Phosphoreszenzenergie gewonnen werden. — Auch in anderer Beziehung scheint das Studium dieses Energieumsatzes von Interesse zu sein; man wird einen Vergleich mit den analogen Wirkungen der Kathodenstrahlen anstellen können, und vor allem dürften sich einige Schlüsse über den Wirkungsgrad bei der Szintillationserregung der α-Strahlen ermöglichen.

Hr. Geheimrat W. Wien übertrug mir deshalb die Untersuchung dieser Frage, über die im folgenden zu berichten ist.

III. Methoden und Apparate.

1. Die Methode der Untersuchung bestand darin, daß sowohl die auf den Phosphoreszenzschirm auftreffende Kanalstrahlenenergie als auch die als Phosphoreszenzlicht ausgesandte Energie absolut mit Thermoelement und Galvanometer gemessen wurde. Bei der Messung der Phosphoreszenzenergie war dabei der Umweg über ein Vergleichslicht gleicher spektraler Zusammensetzung notwendig. Dieses wurde mit dem Phosphoreszenzlicht auf photometrischem Wege verglichen und dann absolut gemessen. Ein mehr als spurenweises Nachleuchten habe ich bei den Phosphoren niemals wahrgenommen. Auch waren die Zeiten der Bestrahlung stets nur sehr kurz. Eine Lichtaufspeicherung braucht deshalb nicht berücksichtigt zu werden.

Als für die Beobachtung gut geeignet erwies sich der grüne $SrSBiNa_2SO_4$-Phosphor[1]), weil er einerseits zu den hellsten gehört und bei Erregung mit Kanalstrahlen eine recht einfache spektrale Zusammensetzung besitzt, andererseits den zerstörenden Einflüssen der Strahlen weniger unterworfen zu sein scheint als das am meisten benutzte Zinksulfid. Die phosphoreszierende Substanz wurde von Leppin & Masche bezogen. Wie Hr. Geheimrat Lenard mir freundlichst mitteilte, entsprechen die von dieser Fabrik hergestellten Phos-

1) Über die Bezeichnung siehe die zitierten Arbeiten von P. Lenard.

phore den an sie gestellten Ansprüchen als wohldefinierte Körper.

Die Versuchsanordnung ist aus Figg. 1 und 2 ersichtlich. Fig. 1 zeigt schematisch die ganze Anordnung. Das Versuchsrohr ist in der Seitenansicht, der optische Teil, der größeren Klarheit wegen, von oben dargestellt. Da gute Reinheit des Gases eine Vorbedingung für das Erhalten maximaler und stets reproduzierbarer Phosphoreszenz ist, andererseits aber die Erdalkaliphosphore stets Schwefelwasserstoff abgeben, auch gefettete Hähne und Schliffe nicht zu vermeiden waren, mußte beim Arbeiten die von W. Wien[1]) angegebene Methode benutzt werden, bei der das Gas (Wasserstoff) in kontinuierlichem

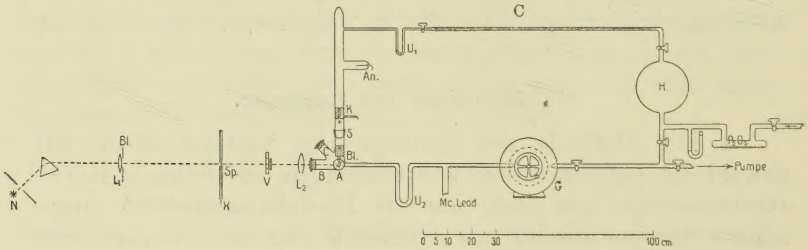

Fig. 1.

Strome durch das Rohr fließt. Der Gasvorratsraum H wurde bis zu einem passenden, am abgekürzten Manometer M abzulesenden Druck mit Wasserstoff aus einem Kippschen Apparat gefüllt. Das Gas war über P_2O_5 getrocknet. Es strömte dann durch die ca. 0,1 mm weite Kapillare C in das Kanalstrahlenrohr und wurde mit der Gaedepumpe G dauernd abgepumpt. Zwischen Kapillare und Rohr ist ein Hahn angebracht, der die Zuströmung abzustellen erlaubt. Kupferdrahtspiralen verhindern die Entladung, an den Hahn zu gelangen. Die U-förmig gebogenen Rohre U_1 und U_2 dienen zur Kühlung mit fester Kohlensäure und Aceton. Es war sehr wichtig, für gutes Fernhalten der Quecksilberdämpfe zu sorgen, da diese die Phosphoreszenz sehr ungünstig beeinflussen. Die Rohrleitungen waren so gebogen, daß U_1 und U_2 in einem gemeinsamen Dewargefäß gekühlt werden konnten. Als Vorpumpe diente die Guryk-Ölpumpe des Instituts.

---

1) W. Wien, Ann. d. Phys. 8. p. 252—254. 1902.

Das Versuchsrohr ist noch einmal in Fig. 2 in der Vorderansicht gezeichnet.

An das große, horizontal gelagerte Rohr *A* stößt das eigentliche Kanalstrahlenrohr *R*. Es ist abnehmbar durch einen ungefetteten, mittels Piccins gedichteten Schliff aufgesetzt. *An* ist die aus einem Aluminiumzylinder bestehende Anode. Die Kathode *K* ist ein 4.5 cm langer, mit einer Boh-

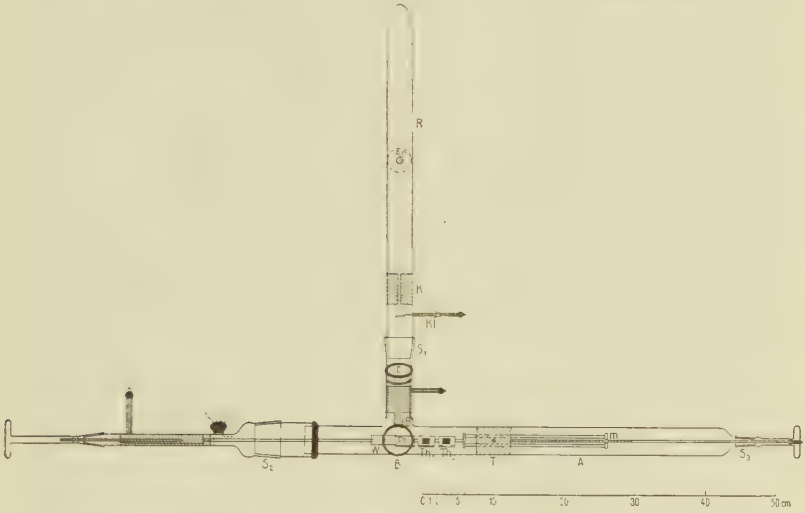

Fig. 2.

rung von 2 mm Weite versehener Eisenzylinder mit Aluminiumstirn. *Kl* ist eine durch einen Schliff drehbare Klappe aus Aluminium. Sie erlaubt, den Strahl bequem abzuschirmen. Die kleine rechteckige Blende *Bl*, ca. 2 cm von der Auftreffstelle des Strahles auf den Phosphoreszenzschirm entfernt, schneidet aus dem bereits verbreiterten Strahl den mittleren Teil scharf begrenzt heraus. Senkrecht zum Kanalstrahlenrohr und senkrecht zum Rohre *A* ist der 8 cm lange Ansatz *B* angeblasen, durch den das Vergleichslicht in das Innere des Rohres auf einem weißen Schirm entworfen wird. Das gegen diesen Ansatz und das Kanalstrahlenrohr unter 45° geneigte Ansatzstück *C* dient zum Beobachten des Phosphoreszenzschirmes, dessen Normale in die Achse des Rohres *C* fällt. *B* und *C* sind mit guten Glasplatten verschlossen.

Das lange Rohr A bildet den eigentlichen Beobachtungsraum, in dem mittels des Schliffes S_3 ein Thermoelement zur Messung der Energie des Vergleichslichtes, eines zur Messung der Kanalstrahlenenergie und der Phosphoreszenzschirm verschoben werden können. Die Messingtrommel T, die an ihrer Stelle fixiert ist, besitzt zwei Durchbohrungen, durch die zwei starr miteinander verbundene Messingstäbe hindurchführen. Das Verbindungsstück m ist mit einer Mutter versehen. Die hindurchführende Schraube stützt sich auf die Trommel T. Durch Drehen des Schliffes S_3 können die Thermoelemente und der Phosphoreszenzschirm in den Weg des Strahles gebracht werden. Die Thermoelemente sowie der Schirm sind unter 45^0 gegen die Vertikale geneigt. S_2 ist ein großer Schliff, an dem das Rohr geöffnet werden kann. Mittels des Schliffes S_4 endlich kann, ebenfalls mit Mutter und Schraube, ein aus mattem, weißem Zeichenpapier gefertigter Schirm verschoben werden, auf dem das Vergleichslicht entworfen wird. Er war so justiert, daß der Phosphor gerade noch unter ihm hindurchgeschoben werden konnte. Dadurch war es ermöglicht, immer frische Stellen der Phosphorschicht unmittelbar neben das Vergleichslicht zu bringen, was sich wegen des raschen Verderbens der Phosphore im Kanalstrahl als notwendig erwies, wenn mehrmals photometriert werden sollte.

Als Lichtquelle für das Vergleichslicht diente eine 110-Volt-Projektions-Nernstlampe mit vertikal gestelltem Faden. Mittels der Linse L_1 (Brennweite 30 cm) und des Prismas Pr wurde an der Stelle K ein Spektrum entworfen, wobei der Nernstfaden selbst als Spalt diente. Der Papierschirm P war dann über die ganze Fläche weiß erhellt. Durch die Linse L_2 (Brennweite 15 cm) wurden die Strahlen konzentriert, so daß ein weißes helles Bild der rechteckigen Blende Bl auf dem Schirm scharf und verkleinert erschien. An die Stelle des Spektrums wurde dann der Spalt K gebracht, hinter dem sich verschiebbar ein photographischer Photometerkeil mit Millimeterteilung befand. Der Spalt war 2 bis 3 mm breit und schnitt den grünen Teil des Spektrums aus. Dann erhielt man einen grünen, scharf begrenzten, rechteckigen Lichtfleck auf dem Papierschirm. Das Spektrum des Nernstfadens war indessen nicht rein, ein Umstand, der mit Erfolg zur Imitation der spektralen Zusammensetzung des Phosphoreszenzlichtes

verwertet werden konnte. Nach den erwähnten Beobachtungen von H. Baerwald treten bei den Phosphoren im Kanalstrahl diejenigen Banden auf, die bei einer Temperatur von 300 bis 350° C. durch Licht allein noch angeregt werden. Für SrBi-Phosphor ist die spektrale Verteilung bei 200° und 400° C. nach P. Lenard[1]) durch folgende Zahlen kurz charakterisiert:

Ungefähre Ausdehnung des Spektrums	Maximum (einziges)
$t = 200°$ C.	
430 $\mu\mu$ bis 660 $\mu\mu$.	530 $\mu\mu$.
$t = 400°$ C.	
490 $\mu\mu$ bis 590 $\mu\mu$.	530 $\mu\mu$.

Das Spektrum ist nach beiden Grenzen hin sehr verwaschen, der Abfall der Intensität nach beiden Seiten vom einzigen Maximum steil.

Die Betrachtung des Phosphoreszenzspektrums bei Kanalstrahlenerregung mit einem Handspektroskop, das mit einer Wellenlängenskala versehen war, ergab:

Ungefähre Ausdehnung des Spektrums	Maximum
470 $\mu\mu$ bis 610 $\mu\mu$.	ca. 530 $\mu\mu$.

Der Abfall nach beiden Seiten vom Maximum ist steil.

Diese Verteilung entspricht, in Übereinstimmung mit H. Baerwald, durchaus der, die man bei einer zwischen 200° C. und 400° C. gelegenen Temperatur beobachten müßte. Das Spektrum erstreckt sich nach beiden Seiten weiter als bei 400° und weniger weit als bei 200°, entsprechend dem immer weiteren Zurücktreten der blauen und gelben Bande dieses Phosphors gegenüber der grünen β-Bande, der das beobachtete Maximum entspricht, mit steigender Temperatur. Die für die Gesamtemission wesentlich in Betracht kommende Bande ist demnach die grüne β-Bande. Durch passende Einstellung des Spaltes konnte nun leicht der gewünschte Spektralbereich um 530 $\mu\mu$ ausgeblendet werden. Infolge der erwähnten Unreinheit des Spektrums war dann im Spektroskop beim Vergleichslicht gerade wie beim Phosphor ein ausgedehnter Spektralbereich

1) P. Lenard u. W. Klatt, Ann. d. Phys. 15. 1904; s. Kurventafel daselbst.

sichtbar mit einer hellsten Stelle bei 530 $\mu\mu$ und einem starken Abfall der Intensität nach beiden Seiten. Durch zweckmäßige Justierung des Spaltes im Nernstlampenspektrum erhielt man auch leicht die richtigen Grenzen. Dann entsprach auch die Farbe des Vergleichslichtes durchaus der des Phosphors. Man wird also schließen dürfen, daß das Vergleichslicht in seiner spektralen Zusammensetzung dem Phosphoreszenzlicht sehr nahe kam. Einmal fixiert, wurden die optischen Teile der Apparatur nicht geändert. Alle Teile waren möglichst fest an ihrem Orte befestigt. V (Fig. 1) ist eine Metallklappe, die von dem Beobachtungsort am Galvanometer die Strahlen abzuschirmen oder zuzulassen erlaubt.

Der Phosphoreszenzschirm wurde durch Sieben des etwas in einem Achatmörser zerkleinerten Phosphorpulvers auf eine mit wenig Alkohol angefeuchtete Glasplatte hergestellt. Die Schichten mögen einige Zehntel Millimeter dick gewesen sein. War der Alkohol verflüchtigt, so haftete die Schicht gut.

Die benutzten Thermoelemente waren von ähnlichem Typus wie das Johansensche[1]), nur mit dem Unterschied, daß die Flächen genügend groß waren, um die gesamte auffallende Strahlung aufzufangen. An ein dünnes Stück Silberfolie von ca. 1 cm² Fläche wurde ein Manganin- und ein Konstantandraht von je 0,015 mm Dicke mit sehr wenig leichtflüssigem Lot gelötet. Die vier freien Enden waren an zwei größere, hufeisenförmige Messingbügel, die auf einer rechteckigen Platte aus Hartgummi aufgeschraubt waren, gelötet. Ein aufgesetzter Metallschirm mit rechteckiger Öffnung ließ nur die Thermoelementfläche frei. Das Thermoelement zur Messung des Vergleichslichtes war berußt, das zweite schwarz platiniert. Die Kanalstrahlenenergie wurde mit einem d'Arsonval-Galvanometer von Hartmann & Braun mit einer Empfindlichkeit von $1{,}23 \cdot 10^{-8}$ Amp. bei 2 m Skalenabstand gemessen. Da die Vergleichslichtmessung, wie sich bald zeigte, sehr viel empfindlichere Mittel erforderte, benutzte ich zu diesem Zwecke ein Kugelpanzergalvanometer, das fest auf einer eingemauerten Steinplatte aufgestellt war. Die gewählte Empfindlichkeit betrug $2{,}22 \cdot 10^{-10}$ Amp., der innere Widerstand 11 Ω, die ganze Schwingungsdauer 14 Sek. Die Skala hatte einen Abstand von

1) Johansen, Ann. d. Phys. **33.** p. 517—536. 1910.

2 m. Die Zuleitungsdrähte waren eng umeinander gewickelt und, soweit als notwendig, durch Metallrohre geschützt.

Als Stromquelle diente eine selbsterregende Influenzmaschine mit vier rotierenden Scheiben. Um die Gleichmäßigkeit des Betriebes auch im Sommer und bei feuchter Witterung zu garantieren, befand sie sich nebst den Widerständen und dem Motor unter einem großen Kasten, der aus einem mit dickem Papier überzogenen Holzgerüst bestand. An der einen Schmalseite des Kastens wurde durch einen mit Bunsenbrennern geheizten Weißblechtrichter heiße Luft vermittelst eines Ventilators in den Kasten geblasen. Die Maschine arbeitete dann gut bei jedem Wetter. Der negative Pol der Maschine war ebenso wie die Kathode geerdet, der positive mit der Anode des Rohres verbunden.

IV. Die Ermüdungserscheinung der Phosphore im Kanalstrahl.

¶ Das erwähnte rasche Verderben der Phosphore unter der Einwirkung der Kanalstrahlen machte sich, trotz sorgfältiger Reinigung des Rohres durch starke Induktorentladung und tunlichster Fernhaltung von Quecksilberdampf, sehr unangenehm bemerkbar. Das Verderben findet, nach allen bisherigen Erfahrungen, bei einer Zerlegung des Strahles weit stärker im unabgelenkten Fleck statt, offenbar infolge der größeren hier auftreffenden Strahlendichte und der nie ganz zu vermeidenden Anwesenheit von Hg im Strahl. Da sowohl eine Zerlegung als eine Schwächung des Strahles (etwa durch eine zwischen Kathode und Blende einzuschaltende Kapillare) die Anordnung wesentlich kompliziert hätte, zog ich es vor, die beschriebene Methode zu benutzen, bei der immer frische Stellen des Phosphors in den Weg der Strahlen gebracht werden können. Die Photometrierung ging dann so vor sich, daß zunächst eine derartige Stellung des Photometerkeiles durch Vorversuche ermittelt wurde, daß der bei dem ersten Auftreffen der Kanalstrahlen entstehende Phosphoreszenzfleck etwas heller war als das Vergleichslicht. Dann wurde eine frische Stelle des Phosphors bei geschlossener Klappe im Rohr neben den weißen Vergleichslichtschirm gebracht und die Kanalstrahlen durch Entfernung der Klappe auf den Phosphorschirm gelenkt. Der Phosphoreszenzfleck grenzte scharf an den Vergleichsfleck. Sobald durch das rasche Verderben die beiden Flecke gleich hell waren, wurde die

Klappe geschlossen und die Zeit zwischen dem Öffnen und Schließen der Klappe an einer Stoppuhr abgelesen. Darauf wurde der Keil verschoben und von neuem in gleicher Weise photometriert. War die benutzte Stelle des Phosphors bereits stark verdorben, was nach einer Zeit der Bestrahlung von insgesamt etwas mehr als einer halben Minute der Fall war, so konnte der Phosphor verschoben werden und die Photometrierungen von neuem beginnen. So fand ich durch das Photometrieren an einer Stelle der Phosphorschicht den zeitlichen Verlauf der Ermüdung und suchte durch Photometrieren an immer wieder frischen Stellen der Schicht sukzessive die

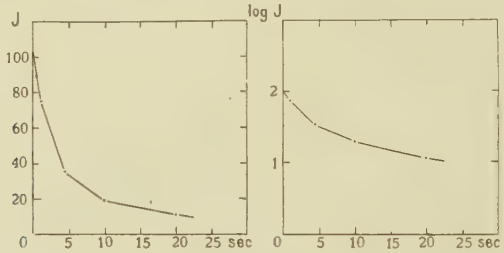

Fig. 3.

Keilstellung auf, bei der das Vergleichslicht die gleiche Helligkeit besaß, wie eine frische Stelle des Phosphors im ersten Moment der Bestrahlung. Der zeitliche Verlauf des Verderbens ist in Fig. 3 dargestellt. Als Abszissen sind die Zeiten in Sekunden nach dem ersten Augenblicke der Bestrahlung aufgetragen, als Ordinaten die relativen Helligkeiten J des Phosphoreszenzfleckes, wie sie aus der später mitzuteilenden Eichkurve des Photometerkeiles sich ergeben. Die zweite Kurve zeigt deutlicher, daß die Intensitätsabnahme in gleichen Zeiten nicht gleich ist; andernfalls müßte man eine Gerade erhalten. Im Anfang ist die Intensitätsabnahme wesentlich stärker. Es erhebt sich deshalb die Frage, ob die erste große Helligkeit mit dem darauffolgenden steilen Abfall nicht vielleicht einen anderen Ursprung hat als das spätere, weniger helle und langsamer abnehmende Leuchten. Es wäre sehr wohl möglich, daß die Kanalstrahlen eine ähnliche ausleuchtende Wirkung auf die Phosphore ausüben, wie ultrarotes Licht oder einfaches Erhitzen. Diese für meine Versuche prinzipiell wichtige Frage mußte zunächst entschieden werden. Handelt es sich um einen

Ausleuchtevorgang, so wird ja lediglich die durch frühere Belichtung aufgespeicherte Energie aus dem Phosphor ausgetrieben, und diese ist es dann, die das hellste Leuchten des Phosphors am Anfang bedingt. Ich stellte deshalb folgende Versuche an:

Es wurde versucht, den nur wenige Sekunden mit Kanalstrahlen bestrahlten Phosphor durch Belichten mit einer Quecksilberlampe zu regenerieren. Das gelang jedoch nicht.

Ferner stellte ich bei roter Dunkelkammerbeleuchtung eine Phosphorschicht her, die zur Hälfte aus Pulver bestand, das über der Bunsenflamme auf einem Blech völlig ausgeleuchtet war und zur anderen Hälfte aus nicht ausgeleuchtetem Phosphorpulver. Den Schirm setzte ich ebenfalls bei rotem Licht in das Rohr ein. Der Kanalstrahl fiel so auf die Fläche des Schirmes, daß er teils die ausgeleuchtete, teils die nicht ausgeleuchtete Schicht traf. Trotzdem erschien der Phosphoreszenzfleck schon im ersten Augenblick vollkommen gleichmäßig hell. Man wird also schließen müssen, daß auch das erste helle Leuchten von der Erregung durch Kanalstrahlen herrührt. Eine ausleuchtende Wirkung kommt den Kanalstrahlen nicht zu.[1])

Es läßt sich auch leicht eine andere Erklärung für die anfängliche rasche Intensitätsabnahme geben. Kanalstrahlen dringen bekanntlich nur sehr wenig in die Materie ein; selbst sehr dünne Metallfolien sind für sie nahezu undurchlässig. Trifft nun der ganze Strahl auf den Phosphor, so wird die sehr dünne oberste Schicht von den Teilchen aller Geschwindigkeiten getroffen und rasch zerstört. Dieser Vorgang kann in einer chemischen oder physikalischen Veränderung der Substanz bestehen. Zu der zweiten Ansicht neigt E. Goldstein.[2]) In tiefere Schichten dringen nur die an Zahl geringeren, raschen Teilchen. Der Phosphor leuchtet daher später weniger hell und auch der Zerstörungsvorgang geht langsamer vor sich. Man kann in der Tat beobachten, daß durch Erhöhung der Spannung ein unter langsamen Strahlen verdorbener Phosphor wieder für einige Augenblicke hell leuchtet. — Wirken die Strahlen längere Zeit auf den Schirm, so färbt er sich, wie schon früher beobachtet ist, braun. Es gelingt indessen, einen

1) Auch Kathodenstrahlen besitzen keine auslöschende Wirkung. Vgl. hierzu P. Lenard, Sitzungsber. d. H. Ak. Abt. A. 5. Abh. p. 29. 1912.

2) E. Goldstein, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. **14**. p. 33—42. 1912.

so gänzlich verdorbenen Phosphor durch Erhitzen über der Bunsenflamme vollkommen zu regenerieren. Die Braunfärbung verschwindet und der Phosphor leuchtet, wieder ins Rohr gebracht, so gut wie vorher. Erwähnt sei noch, daß selbst eine bis zur Braunfärbung verdorbene Phosphorschicht, von Licht erregt, kaum merklich schlechter leuchtet als eine frische, ein Beweis, daß das Licht viel tiefer in den Phosphor eindringt als Kanalstrahlen. Auch Kathodenstrahlen besitzen eine nur geringe Eindringungsfähigkeit.[1])

V. Hauptversuche.

Die Versuche wurden nach guter Reinigung des Rohres und meist abends angestellt, wenn die Temperatur im Zimmer sich eingestellt hatte und anderweitige Störungen auf das Panzergalvanometer nicht zu befürchten waren. Die Nernstlampe wurde mit den 70 Volt der großen Institutsbatterie gebrannt, die mit noch 20 Akkumulatoren einer kleineren Batterie hintereinander geschaltet war. Sie brannte dann nach einer halben Stunde außerordentlich konstant mit 0,8 Amp.

Die Stromstärke konnte mit einem Strommesser, der $^2/_{1000}$ Amp. zu schätzen erlaubte, kontrolliert, geringe Schwankungen mit einem Gleitwiderstand reguliert werden; doch war dies äußerst selten nötig. — Alle Beobachtungen führte ich unter genau denselben Bedingungen aus. Änderungen der Entladungsbedingungen bringen stets nicht leicht kontrollierbare Änderungen in der Zusammensetzung des Strahles mit sich.[2]) Das Verhältnis von geladenen und ungeladenen Teilchen im Strahl muß aber nach H. Baerwald[3]) einen Einfluß auf den gesuchten Wirkungsgrad haben. Um einen Überblick über die Genauigkeit der Methode zu gewinnen, schien es deshalb geboten, die Bedingungen möglichst konstant zu halten.

Es wurde zunächst durch Einregulierung der Pumpengeschwindigkeit eine konstante Elektrodenspannung von 5 mm Funke zwischen Kugeln von 1 cm Radius hergestellt. Der im Beobachtungsraum mit einem Mc Leodschen Manometer gemessene Druck betrug dann 0,02 bis 0,03 mm Hg. Stets wurde

1) P. Lenard, Über Lichtsummen bei Phosphoren. Sitzungsber. d. Heidelb. Akad. d. Wiss. 5. Abh. p. 32. 1912.

2) W. Wien, Sitzungsber. der Königl. Preuß. Akad. 1911. p. 773—786.

3) H. Baerwald, l. c.

während der Beobachtung mit einem Gemisch aus fester Kohlensäure und Aceton gekühlt. Zwischen den einzelnen Galvanometerablesungen und Photometrierungen kontrollierte ich die Spannung und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Influenzmaschine. Trotzdem waren Schwankungen nie ganz zu vermeiden. War die Energiemessung der Kanalstrahlen und die in angegebener Weise erfolgende Photometrierung ausgeführt, so wurde die Gaszuströmung durch Schließen des Hahnes zwischen Rohr und Kapillare abgesperrt und bis auf 0,001 Hg-Druck evakuiert. Bei diesem Druck erfolgte die Energiemessung des Vergleichslichtes. Die Empfindlichkeit des Thermoelements war bei diesem Druck fünfmal so groß wie bei Atmosphärendruck und vom Druck sowie von der Art des Gases im Rohr kaum mehr abhängig. Die Empfindlichkeit des Panzergalvanometers wurde vor, während und nach der Messung kontrolliert, ein etwaiger, meist nur geringer Drift durch Beobachtung des Nullpunktes vor und eine Minute nach jedem Ausschlag eliminiert. Hierbei wurde stets der erste Ausschlag des Galvanometers beobachtet. Er war nach 7 Sek. vollendet und der auf das Thermoelement auffallenden Energie proportional. Im folgenden gebe ich zwei der definitiven Beobachtungen ausführlich wieder.

I. Spannung: 5 mm Funkenstrecke (17 500 Volt). Druck im Beobachtungsraum: 0,023 mm Hg.

Messung der Energie der Kanalstrahlen.

0-Punkt	Ablesung	Ausschlag
482	278	204
480	280	200
479	286	193
479	284	195
478	279	199
479	281	198
		Mittel 198

Der größte Unterschied von 5 Proz. ist durch die unvermeidlichen Schwankungen von Strom und Spannung verursacht.

Photometrierung.

Die Keilstellungen sind in Millimeter der Skala angegeben. Größeren Zahlen entspricht größere Schwärzung des Keils, also geringere Helligkeit des Phosphors. Die je fünf Beobachtungen beziehen sich auf eine und dieselbe Stelle des Phosphors.

	Keilstellung	Zeit der Bestrahlung in Sek. nach dem ersten Auftreffen des Strahles.
1.	60	1 (das Vergleichslicht noch etwas zu dunkel)
	80	5
	100	7 (?)
	120	19
	140	40

Hier wurde eine frische Phosphorschicht vorgeschoben.

	Keilstellung	Zeit
2.	50	Vergleichslicht etwas zu hell
	80	5
	100	10
	120	20
	140	38

Frische Stelle des Phosphors:

3.	60	1
	80	4—5
	100	10
	120	20
	140	ca. 40

Frische Stelle des Phosphors:

4.	60	ca. 1
	80	4—5
	100	10
	120	19

Wie man sieht, stimmen die einzelnen Photometrierungen gut überein. Die richtige Keilstellung für die anfängliche Helligkeit des Phosphors liegt, wie man schließen darf, zwischen 50 und 60 mm der Keilskala. Eine genauere Ermittelung ist wegen des raschen Verderbens des Phosphors am Anfang nicht möglich. Die Stellung 55 dürfte aber vom wahren Wert kaum mehr als um 10 Proz. abweichen.

Messung der Energie des Vergleichslichtes mit dem Panzergalvanometer.[1])

0-Punkt	Ablesung nach 7 Sek.	0-Punkt nach 1 Min.	Korrigierter Ausschlag
510	667	520	156
530	686	540	155
540	694	533	155
533	692	541	160
541	695	548	153
548	702	548	154
547	700	548	152
548	706	574	155
472	632	482	159
491	650	493	159
		Mittel	156

Der maximale Fehler beträgt 4 bis 5 Proz.

Die mittlere Empfindlichkeit betrug 115 Skalenteile bei der benutzten Schaltung für die Empfindlichkeitsmessung. Da die angegebene Empfindlichkeit (p. 14) einem Ausschlag von 100 Skalenteilen entspricht, rechnen wir den Ausschlag auf diese Empfindlichkeit um. Es ergibt sich dann der Ausschlag 136 Skalenteile bezogen auf die gewählte Normalempfindlichkeit. Die Spannung des bei der Empfindlichkeitsmessung benutzten Akkumulators wurde vor der Messung kontrolliert.

Eine zweite Messung sei noch angegeben:

II. Spannung: 5 mm Funkenstrecke. Druck im Beobachtungsraum: 0,029 mm Hg.

Messung der Energie der Kanalstrahlen.

Ausschlag	Ausschlag
209	208
217	212
212	214
210	212
217	210
	Mittel 212

Größter Unterschied 4 Proz.

1) Der Keil wurde für diese Messung fortgeschoben; der Ausschlag bezieht sich also auf das ungeschwächte Vergleichslicht.

Photometrierung.

	Keilstellung	Zeit der Bestrahlung in Sek. nach dem ersten Auftreffen des Strahles.
1.	60	Vergleichslicht etwas zu dunkel
	80	3
	100	8
	120	17
Frische Stelle des Phosphors:		
2.	60	1
	80	3—4
	100	9
	120	17—18
	140	33
Frische Stelle des Phosphors:		
3.	60	1
	80	3—4
	100	9
	120	19
	140	38

Es folgen noch zwei weitere mit diesen gut übereinstimmende Photometrierungen.

Es gibt wieder der Wert 55 die nahe richtige Keilstellung an.

Messung der Energie des Vergleichslichtes mit dem Panzergalvanometer.

Ausschlag	Ausschlag
142	145
142	144
140	145
145	144
145	146
Mittel	144

Das Mittel der Empfindlichkeit war bestimmt zu 104. Auf die Normalempfindlichkeit bezogen, erhält man als Ausschlag: 138 Skalenteile.

Eine weitere mit der gleichen Phosphorprobe ausgeführte Photometrierung und Energiemessung führte zu einem innerhalb der möglichen Fehler mit den obigen Beobachtungen übereinstimmenden Resultat.

Endlich führe ich noch eine Messung mit einer anderen Probe desselben Phosphors an. Sie lieferte eine geringere

Helligkeit beim Photometrieren. Doch kann man dieser Messung keinen so großen Wert beilegen, da der Phosphor recht eilig für mich in der Fabrik hergestellt war und wahrscheinlich etwas von der Norm abweichende Eigenschaften besaß. Überhaupt ist klar, daß wesentlich nur die Größenordnung des gesuchten Wirkungsgrades von Bedeutung ist. Nur unter strengster Sorgfalt bei der Herstellung kann man von zwei zu verschiedenen Zeiten präparierten Phosphoren den gleichen Wirkungsgrad erwarten. Dazu kommt noch, daß geringe Verunreinigungen des Gases im Kanalstrahlenrohr die Phosphoreszenzfähigkeit nicht unbeträchtlich beeinflussen. Es ist indessen klar, daß alle diese Einflüsse nicht leicht die Größenordnung des untersuchten Wirkungsgrades ändern können.

Die Größe des Vergleichsfleckes konnte an zwei auf dem weißen Vergleichslichtschirm senkrecht zueinander aufgetragenen Millimeterteilungen abgelesen werden. Die Größe des Phosphoreszenzfleckes ließ sich leicht nachträglich an dem scharf auf dem Phosphor abgezeichneten, gebräunten, rechteckigen Fleck ausmessen, wenn die Stelle nur genügend lange bestrahlt worden war. Es ergab sich: Größe des Vergleichslichtfleckes 0,44 cm^2, Größe des Phosphoreszenzfleckes 0,30 cm^2.

VI. Eichungen.

a) Absolute Eichung der Thermoelemente.

Die Eichung der Thermoelemente wurde mit einem auf 100° C. erhitzten schwarzen Körper ausgeführt. Da diese Eichungen durch direkte Bestrahlung ohne zwischengeschaltete Glasplatten zu geschehen haben, die Messungen selbst aber stets im Vakuum vorgenommen wurden, mußte zunächst die Abhängigkeit der Thermoelementempfindlichkeit vom Druck ermittelt werden. Für das Vergleichsthermoelement ist diese Abhängigkeit in Fig. 4 mitgeteilt. Als Abszissen sind die dekadischen Logarithmen des Druckes aufgetragen, wobei 0,001 mm Hg-Druck als Einheit gilt. Der Maßstab ist dann in allen Druckgebieten der gleiche. Als Ordinaten sind die Ausschläge des Panzergalvanometers gegeben. Bei dem stets benutzten Drucke von 0,001 mm war also die Empfindlichkeit fünfmal größer als bei Atmosphärendruck. Die Druckabhängigkeit ist bei diesen tiefen Drucken nur noch gering, auch spielt die Natur des Füllgases keine Rolle mehr.

Für das Thermoelement zur Messung der Kanalstrahlenenergie teile ich die Druckabhängigkeit nicht mit. Leider erwies sich nämlich nachträglich, daß die benutzten Thermoelemente, wegen allzu großer Feinheit der angewandten Bleche, über die ganze Fläche keine ganz gleichmäßige Empfindlichkeit besaßen. Obwohl dieser Umstand bei den Messungen keinerlei Fehler bedingt, da stets darauf geachtet wurde, daß

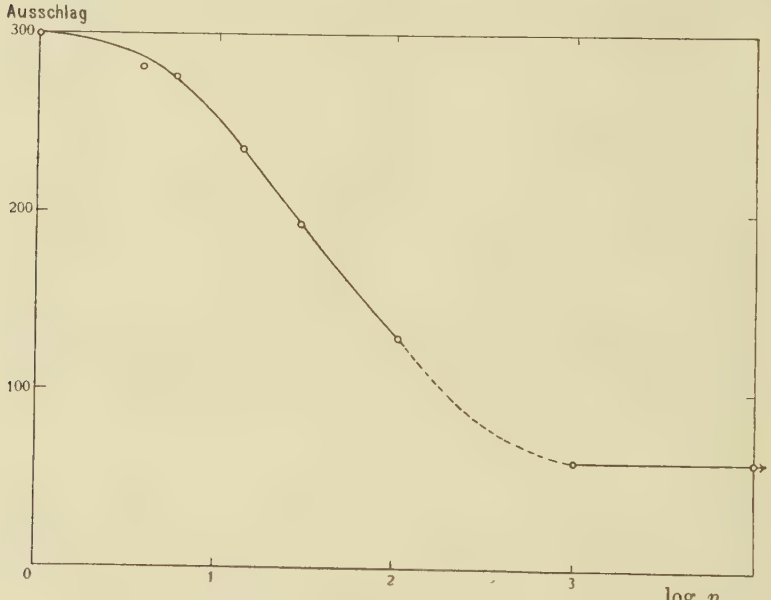

Fig. 4.

$p = \frac{1}{1000}$ mm = 1 gesetzt.

die gleiche Stelle der Thermoelementfläche von den Strahlen getroffen wurde, wären doch für die Eichung hierdurch Schwierigkeiten erwachsen. Hierbei wurde nämlich die ganze Fläche des Thermoelementes bestrahlt. Bei dem Versuch, die gleichen Teile der Flächen auszublenden, die bei den Versuchen bestrahlt wurden, konnten leicht größere Fehler unterlaufen. Es erwies sich deshalb als zweckmäßig, ein drittes, von dem obigen Fehler freies Thermoelement herzustellen, dieses absolut zu eichen und, unter Beobachtung aller Vorsichtsmaßregeln, auf die beiden bei der Messung benutzten Elemente zu reduzieren. Diese Maßregel empfahl sich auch deshalb, weil die

Rußschicht des Vergleichslichtelementes bereits stellenweise etwas verletzt war und die Kanalstrahlen die nur mit Rücksicht auf die spätere Eichung angebrachte Platinierung des anderen Thermoelementes stark angegriffen hatten. Für die Energiemessung der Kanalstrahlen ist dies natürlich ohne Belang. Bemerkt sei noch, daß eine Reflexion der Kanalstrahlen bei den von mir benutzten Geschwindigkeiten überhaupt nicht mehr merklich ist.[1]) War das neue Thermoelement gut schwarz, so fielen durch die benutzte Methode auch die etwaigen kleinen Fehler hinaus, die durch die geringen Beschädigungen der Rußschicht entstehen konnten. Während der definitiven Messungen waren keine merklichen Veränderungen mehr an den Thermoelementen beobachtet. Dafür bürgen auch die Übereinstimmungen bei den verschiedenen Beobachtungen.

Das dritte Thermoelement, das der Kürze halber im folgenden mit III bezeichnet werden mag, während das Thermoelement, mit dem das Vergleichslicht ausgemessen wurde, die Bezeichnung I, das zur Messung der Kanalstrahlenenergie die Bezeichnung II erhält, wurde aus einem 0,02 mm dicken Silberblech in sonst gleicher Weise wie früher hergestellt. Seine Fläche betrug 1,06 cm^2. Das Blech wurde sorgfältig schwarz platiniert. Die Prüfung ergab eine ganz gleichmäßige Empfindlichkeit über die ganze Fläche. Auch war dieses Thermoelement noch so wenig träge, daß als Maß der auffallenden Energie der erste Ausschlag mit dem Panzergalvanometer betrachtet werden durfte.

Die Reduktion des Thermoelementes I auf III wurde so ausgeführt, daß sich dabei I in der gleichen Stellung gegen die einfallenden Strahlen befand, wie bei den Messungen selbst. Auch war der bestrahlte Teil der Fläche der gleiche. Ich fand aus sechs übereinstimmenden Beobachtungen:

$$\text{Empfindlichkeit } \frac{\text{III}}{\text{I}} = \frac{78{,}0}{41{,}7} = 1{,}87.$$

Die Vergleichung von Thermoelement II mit III wurde zweckmäßig durch Bestrahlung mit Kanalstrahlen vorgenommen. Dadurch wurden mögliche Fehler vermieden, die dadurch entstehen konnten, daß das auftreffende Kanalstrahlenbündel

1) B. Saxén, Akad. Abh. Helsingfors 1912 und Ann. d. Phys. **38.** p. 319—354. 1912.

nicht im ganzen Querschnitt die gleiche Energie besitzt. Bei der Eichung mit Kanalstrahlen waren die Bedingungen jedenfalls die gleichen wie bei der Messung. Aus zwei an verschiedenen Tagen ausgeführten Beobachtungsreihen ergab sich:

$$\text{Empfindlichkeit } \frac{\text{III}}{\text{II}} = \frac{296}{206} = 1{,}44 \text{ und}$$

$$\frac{\text{III}}{\text{II}} = \frac{301}{207} = 1{,}46$$

in sehr guter Übereinstimmung. Der Druck im Beobachtungsraum betrug 0,024 mm Hg.

Es ist nun noch notwendig, zu wissen, wie sich die Emp-

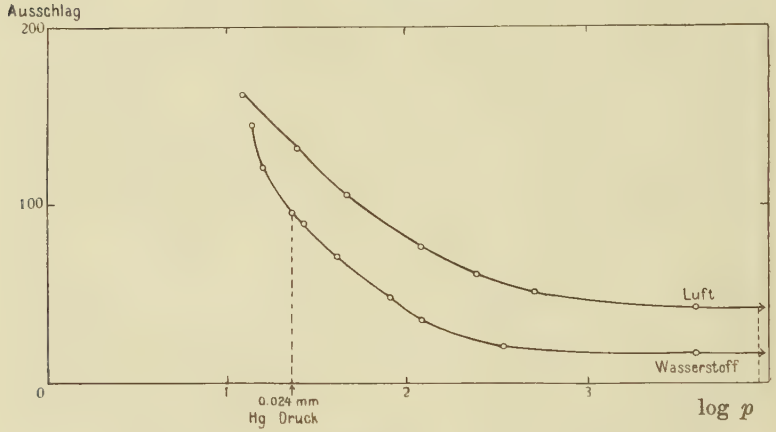

Fig. 5.

$p = \frac{1}{1000}$ mm = 1 gesetzt

findlichkeit des Thermoelementes III in Wasserstoff von 0,024 mm Hg-Druck[1]) zu der Empfindlichkeit in Luft von Atmosphärendruck verhält.

Bei dem verhältnismäßig hohen Druck von 0,024 mm ist die Empfindlichkeit von der Art des Gases im Rohr noch beträchtlich abhängig. Fig. 5 gibt die hierauf bezügliche Messung wieder.

Entsprechend der größeren Leitfähigkeit des Wasserstoffs ist die Empfindlichkeit von Luft in Atmosphärendruck größer

1) Dieser Druck war auch während der ersten angeführten Messung im Rohr.

als in Wasserstoff. In Wasserstoff wird aber die Empfindlichkeit infolge der größeren freien Weglänge früher vom Druck unabhängig. Die Kurven durchkreuzen sich tatsächlich deswegen in der Nähe von $^1/_{100}$ mm Hg-Druck. Bei ca. $^1/_{1000}$ mm Druck spielt die Natur des umgebenden Gases, wie schon erwähnt, keine Rolle mehr. Die Kurven fallen dann zusammen und verlaufen nahe parallel der Abszissenachse. Das gesuchte Empfindlichkeitsverhältnis des Thermoelementes III bei Wasserstoffdruck von 0,024 mm zu Luftdruck von einer Atmosphäre entnimmt man aus Fig. 5 zu: 96/42 = 2,24.

Nunmehr ist alles auf das Thermoelement III reduziert, das absolut geeicht werden kann.

Der schwarze Körper bestand aus einem doppelwandigen, innen geschwärzten Kupferhohlraum mit einer kreisrunden Öffnung. Zwischen den Wänden wurde Wasserdampf durchgeleitet und die Beobachtungen begannen erst, wenn der Zustand stationär geworden war. Unmittelbar vor dem schwarzen Körper stand ein dauernd von Leitungswasser durchströmter großer Kupferschirm mit einer Öffnung, die nur das Loch im schwarzen Körper frei ließ, während von seinen Wandungen von vorn nichts zu sehen war. Eine ebenfalls von Wasser durchströmte schwarze Klappe vor der Öffnung gestattete die Strahlen abzuschirmen. Das Thermoelement befand sich 57 cm von der Öffnung des schwarzen Körpers entfernt, derselben genau gegenüber. Es war gut vor Luftströmungen geschützt.

Eine Beobachtung sei kurz mitgeteilt:

Abstand Thermoelement—schwarzer Körper: $l = 57$ cm.

Fläche der strahlenden Öffnung: $Q = 20{,}4$ cm^2.

Fläche des Thermoelementes: $q = 1{,}06$ cm^2.

Temperatur des schwarzen Körpers: $t_s = 99{,}9^0$ C. (Barometerstand: 758,3 mm).

Temperatur der Klappe: $t_k = 13{,}6^0$ C.

Aus zehn sehr gut übereinstimmenden Ablesungen am Panzergalvanometer wird der Ausschlag für die Normalempfindlichkeit zu 392 Skalenteilen gefunden. Hieraus berechnet sich die absolute Empfindlichkeit des Thermoelementes III bei Benutzung des Panzergalvanometers von der gewählten Empfindlichkeit aus folgendem Ausdruck:

$$\varepsilon = \frac{\sigma\,(T_s^4 - T_k^4)\,q\,Q}{\pi\,l^2\,392}.$$

σ ist hierbei die Kurlbaumsche Konstante:[1])

$$5{,}36 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Erg}}{\text{cm}^2 \text{ sec Grad}^4}.$$

Es ergibt sich als auf das Thermoelement III auffallende Energie pro Skalenteil Ausschlag hieraus:

$$\varepsilon = 3{,}66 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 8{,}71 \cdot 10^{-8} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Eine zweite in ganz gleicher Weise ausgeführte Messung ergab in guter Übereinstimmung:

$$\varepsilon = 3{,}61 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 8{,}61 \cdot 10^{-8} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Für dasselbe Thermoelement mit Benutzung des d'Arsonval-Galvanometers ergibt sich:

$$\varepsilon' = 204 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 7{,}86 \cdot 10^{-6} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Denn das Panzergalvanometer war, mit Berücksichtigung des Umstandes, daß mit diesem Galvanometer stets der erste Ausschlag beobachtet wurde, 56,2 mal empfindlicher als das d'Arsonval-Instrument. — Mit Benutzung der mitgeteilten Reduktionen erhält man endlich:

Auffallende Energie pro Skalenteil Ausschlag für das Thermoelement I mit Panzergalvanometer bei 0,001 mm Druck:

$$\frac{3{,}64 \cdot 1{,}87}{5} = 1{,}36 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 3{,}24 \cdot 10^{-8} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Auffallende Energie pro Skalenteil Ausschlag für das Kanalstrahlenthermoelement II mit d'Arsonval bei Wasserstoff von 0,024 mm Druck (siehe erste Messung).

$$\frac{204 \cdot 1{,}45}{2{,}24} = 133 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 3{,}16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Bei der zweiten Messung (p. 21) war der Druck 0,029 mm[2]), daher:

$$\frac{204 \cdot 1{,}45}{2{,}02} = 146 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 3{,}50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

b) Eichung des Photometerkeils.

Die Durchlässigkeit des Keils wurde mit dem Spektralphotometer von König & Martens im Grün ermittelt. Dabei

1) F. Kurlbaum, Ann. d. Phys. **65.** p. 759. 1898.
2) Siehe Kurve 5.

war der Faden einer Nernstlampe auf dem Keil abgebildet. Als Vergleichslichtquelle diente eine 25 kerzige Osramlampe. Die Stromstärke wurde konstant gehalten. Für jede Keilstellung machte ich fünf Ablesungen. Die durchgelassene

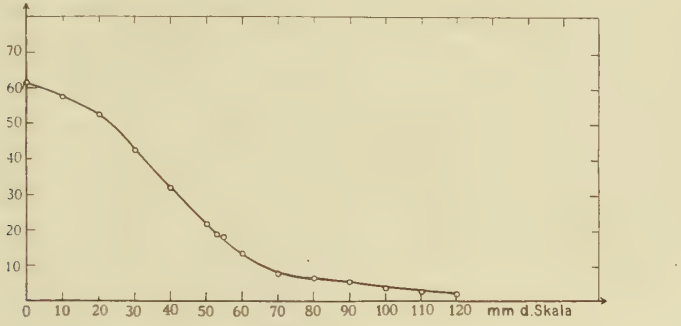

Fig. 6.

Energie in Prozenten der auffallenden ist in Fig. 6 als Funktion der Keilstellung aufgetragen.

Für die Keilstellung 55 ergibt sich als durchgelassene Menge 18,1 Proz.

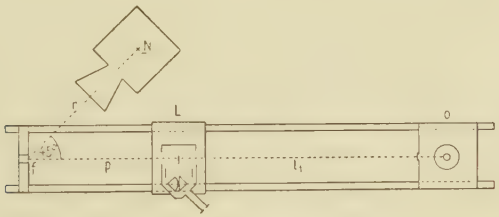

Fig. 7.

c) Bestimmung des Reflexionsvermögens des weißen Vergleichslichtschirmes.

Da sich das Spektralphotometer für diese Messung als ungeeignet erwies, benutzte ich ein Lummer-Brodhunsches Photometer. Die Methode der Eichung ist aus Fig. 7 ersichtlich. *f* ist der reflektierende Papierschirm, der stramm über eine Öffnung in einem Brett gespannt und ganz von schwarzem Samt umgeben war. Seine Fläche betrug 16 cm². Der Nernstfaden *N* befand sich in einem innen und außen schwarzen

Kasten mit einem trichterförmigen, innen mit Samt ausgefütterten Ansatz zur Abhaltung direkter Strahlung des Nernstfadens vom Photometer. Seine Entfernung vom Schirm betrug 44 cm. *O* ist eine 100 kerzige, ebenfalls von einem schwarzen Kasten umgebene Osramlampe. Als Vergleichslichtquelle diente eine kleine, von dieser Lampe bestrahlte Milchglasscheibe in der Vorderwand des Kastens. Die ganze Photometerbank war mit schwarzen Tüchern abgedeckt. Die Konstanz der Lampen wurde kontrolliert. Zuerst wurde der reflektierende Schirm gegen das Vergleichslicht photometriert, dann der Nernstfaden selbst, der für diesen Zweck an die Stelle des Schirmes gebracht wurde. Jedesmal wurden zehn Einstellungen gemacht. Die Übereinstimmung war sehr gut. Im Mittel ergab sich:

1. Entfernung Photometer—Schirm: $p = 53{,}4$ cm.
„ „ —Vergleichslicht: $l_1 = 168$ cm.
2. „ „ —Nernstfaden: $n = 197$ cm.
„ „ —Vergleichslicht: $l_2 = 24{,}7$ cm.

Zu bemerken ist, daß die Bestrahlung des Schirmes bei dieser Reflexionsbestimmung unter demselben Winkel vor sich ging, wie bei den eigentlichen Messungen (45°).

Die auf den Schirm von der Nernstlampe auffallende Energie beträgt:

$$\frac{N}{2\pi r^2} f \cos 45^0,$$

wenn N die in der Halbkugel vom Nernstfaden ausgesandte Energie bedeutet, r die Entfernung des Nernstfadens vom Schirm und f die Fläche des Schirmes. Der Schirm möge von dieser Energie den Bruchteil $\delta\, d\omega$ in dem Elementarkegel von der Öffnung $d\omega$ in seiner Normalen aussenden:

$$\frac{\delta \cdot N}{2\pi r^2} d\omega f \cos 45^0.$$

Der Nernstfaden selbst strahlt in dem gleichen Elementarkegel die Energie:

$$\frac{N}{2\pi} d\omega$$

aus. Nun ist:

$$\frac{l_1^2\, \delta\, d\omega\, N f \cos 45^0}{p^2\, 2\pi r^2} = \frac{l_2^2\, N\, d\omega}{n^2\, 2\pi}$$

und daraus:

$$d\omega\, \delta = \frac{l_2^2\, p^2\, r^2\, d\omega}{l_1^2\, n^2\, f \cos 45^0} = \underline{0{,}273\ d\omega}.$$

Mit diesem Wert hat man, nach Berücksichtigung der Schwächung durch den Keil, die mit dem Thermoelement gemessene Vergleichslichtenergie zu multiplizieren. Dann erhält man die im Elementarkegel in normaler Richtung von Phosphor ausgesandte Energie. Um die gesamte ausgestrahlte Energie des Phosphors zu berechnen, muß man indessen noch wissen, nach welchem Gesetz die Phosphorschicht ausstrahlt.

d) Versuche über die Ausstrahlung der Phosphorfläche.

Es erscheint zunächst möglich, daß der Phosphoreszenzfleck nach allen Richtungen gleich viel Energie ausstrahlt; in diesem Falle wäre einfach über die Kugel zu integrieren. Andererseits könnte das Phosphoreszenzlicht bereits durch die dünnsten oberen Schichten diffus heraustreten, so daß das Lambertsche Kosinusgesetz gilt. Zur Entscheidung dieser Frage stellte ich deshalb Versuche an. Sendet der Phosphor nach allen Seiten gleich viel Energie aus, so muß er, von der Seite betrachtet, heller erscheinen als von vorn, und zwar im umgekehrten Verhältnis des cos der Visierrichtung gegen die Normale; denn die Fläche erscheint in dem direkten Verhältnis des cos kleiner. Indessen kann man das bei Erregung mit Licht nicht beobachten. Man kann kaum annehmen, daß durch den größeren vom Licht im Phosphor zurückgelegten Weg, bei schräger Anvisierung, so viel größere Absorption des Phosphoreszenzlichtes erfolgt, daß dadurch die Erscheinung nicht wahrnehmbar wird, wenigstens nicht, wenn man sich auf nicht zu große Winkel beschränkt. Nach den Versuchen von P. Lenard[1]) vermag nämlich das Phosphoreszenzlicht wesentlich dickere Schichten des Phosphors merklich ungeschwächt zu durchdringen, als das erregende Licht. Indessen sind diese meine Versuche, da nicht photometriert wurde, nur orientierender Natur. Auch konnten die Verhältnisse bei der vielleicht nur $^1/_{1000}$ mm eindringenden Kanalstrahlenerregung anders liegen. Ich photographierte deshalb den von Kanalstrahlen erzeugten Phosphoreszenzfleck mit zwei vollkommen gleichen Apparaten normal und unter 45° gegen die Normale des Phosphors durch die Glasfenster des Rohres B und C (s. Fig. 1). Die Apparate waren zwei 9×12 Sonnet-Cameras der Sontheimer

1) P. Lenard, Über Lichtsummen bei Phosphoren. Heidelb. Akad. Abt. A. Abh. 5. 1912. p. 32.

Nettel-Camera-Werke mit Nettel-Rapid-Aplanat. Sie wurden mir von Hrn. Photograph Sattler in Würzburg freundlichst zur Verfügung gestellt. Durch Aufnahme einer schwach erleuchteten Milchglasscheibe mit beiden Apparaten bei gleicher Expositionszeit und mit Benutzung derselben Platte überzeugte ich mich von der vollkommenen Gleichheit der Lichtstärke beider Objektive. Die Schwärzungen wurden mit einem Hartmannschen Mikrophotometer verglichen. Die gleichzeitige Aufnahme des Phosphoreszenzfleckes aus beiden Richtungen ergab vollkommen gleiche Schwärzungen. Ich benutzte auch hier die gleiche Platte, die im Dunkeln zerschnitten und in die Kassetten eingelegt wurde, und entwickelte gleichzeitig. Man muß demnach schließen, daß das Phosphoreszenzlicht bereits durch sehr dünne Phosphorschichten diffus gemacht wird, so daß für die Ausstrahlung das Lambertsche Gesetz Gültigkeit hat.

VII. Berechnung der Versuchsergebnisse.

Die gesamte Ausstrahlung der Flächeneinheit der Phosphorschicht in der Zeiteinheit nach einer Seite ergibt sich demnach wie folgt:

$$\frac{\delta A \varepsilon \alpha \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi \sin\varphi \cos\varphi \, d\varphi}{F} \quad \text{Erg/cm}^2\,\text{sec}.$$

Hierbei bedeutet: $\delta = 0{,}273$ den vom Vergleichslichtschirm reflektierten Bruchteil der auffallenden Strahlung in normaler Richtung, bezogen auf den Einheitsraumwinkel; $A = 136$ (aus der ersten Messung) die gemessene Energie des Vergleichslichtes (ohne Schwächung durch den Keil) in Skalenteilen;

$\varepsilon = 1{,}36$ Erg/sec die Energie, die in der Zeiteinheit auf das Thermoelement I auffallend den Ausschlag 1 Skalenteil erzeugte;

$\alpha = 0{,}181$ den Bruchteil der auffallenden Energie, der vom Keil an der Stelle 55 durchgelassen wurde;

$F = 0{,}44$ cm² die Größe des Vergleichslichtfleckes. — Man erhält hieraus:

$$\frac{\delta \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot \pi}{F} = 65{,}4 \ \frac{\text{Erg}}{\text{sec}}.$$

Wegen der geringen Eindringungstiefe der Kanalstrahlen trat sicher die gesamte nach vorn ausgestrahlte Energie des Phosphors praktisch ungeschwächt heraus. Aber auch von der nach hinten ausgestrahlten Energie wird ein Teil durch Reflexion nach vorn austreten. Obwohl also durch Multiplikation der obigen Zahl mit 2 ein etwas zu großer Wert für die gesamte Phosphoreszenzenergie resultiert, können wir diesen Wert annehmen. Er ist sicher nicht zu klein und für die Berücksichtigung der Reflexion fehlen die nötigen Daten. Man erhält so für die ganze von der Flächeneinheit des Phosphors ausgestrahlte Energie:

$$P = 131 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 3{,}10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Die gesamte auftreffende Kanalstrahlenenergie, ebenfalls auf die Flächeneinheit bezogen, beträgt:

$$K = \frac{133 \cdot 198}{0{,}30} = 87800 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}} = 2{,}09 \cdot 10^{-3} \frac{\text{gr Kal}}{\text{sec}}.$$

Das gesuchte Verhältnis der Phosphoreszenzenergie zur auftreffenden Kanalstrahlenenergie ist:

$$\underline{0{,}0015.}$$

Aus der zweiten angeführten Messung berechnet sich dieser Wirkungsgrad zu:

$$\underline{0{,}0013.}$$

Man kann also das unmittelbare Ergebnis der Messung dahin aussprechen, daß bei dem untersuchten SrBi-Phosphor nur 0,1 bis 0,2 Proz. der auffallenden Kanalstrahlenenergie in Phosphoreszenzlicht umgewandelt wird.

VIII. Diskussion des Resultates.

Das Resultat der Untersuchung läßt sich auch auf die anderen Phosphore ausdehnen, soweit sie sich in ihrer spektralen Zusammensetzung nicht zu sehr von dem benutzten Phosphor unterscheiden. Besonders ist dies möglich für das ebenfalls grüne Gieselsche Zinksulfid. Diese Substanz leuchtet nach H. Baerwald[1]) 3,5 mal heller im Kanalstrahl als SrBi-Phosphor. Demnach wäre der Wirkungsgrad für diesen Körper

1) H. Baerwald l. c. p. 870. Tab. 2.

0,005. Einen Unterschied in der Wirkung der neutralen und geladenen Teilchen zu berücksichtigen, scheint unzweckmäßig. Die Arbeit von H. Baerwald, die mehr die qualitative Seite der Erscheinung studiert, liefert hier nicht genügend zuverlässige Daten. Für die Frage der Szintillationswahrnehmung ist diese Berücksichtigung deshalb ohne Belang, weil Szintillationen auch im unabgelenkten Fleck beobachtet wurden. Mit dem gewonnenen Wirkungsgrad für ZnS ergibt sich die gesamte bei einer Szintillation als Phosphoreszenzlicht ausgestrahlte Energie für ein Kanalstrahlenteilchen von $1{,}10^8$ cm/sec Geschwindigkeit zu $0{,}4 \cdot 10^{-10}$ Erg. Da die Reizschwelle des Auges ca. $2{,}10^{-10}$ Erg beträgt, so würde eine Szintillation selbst dann nicht wahrgenommen werden können, wenn die gesamte bei einer Szintillation ausgestrahlte Phosphoreszenzenergie ins Auge gelangen könnte.

Das gewonnene Resultat kann also die Wahrnehmung von Szintillationen bei der Phosphoreszenzerregung durch Kanalstrahlen nicht erklären. Die Frage über die Quelle der Energie bei der Phosphoreszenzerregung wird durch die Versuche nicht entschieden.

Von Interesse ist es nun, mit demselben Wirkungsgrad die Möglichkeit von Szintillationswahrnehmungen bei dem Auftreffen von α-Strahlen nachzuprüfen. Man erhält für die bei einer Szintillation ausgestrahlte Lichtenergie:

$$\frac{4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-24} \; 4 \cdot 10^{18} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2} = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \text{ Erg.}$$

Hierbei ist

$$m = 4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-24} \text{ gr},$$

$$v = 2 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

gesetzt.

Auf p. 8 wurde gezeigt, daß von einer Szintillation die Energiemenge $3{,}2 \cdot 10^{-8}$ Erg ausgehen muß, um bei einem Augenabstand von 8 cm und einer Pupillenöffnung von 8 mm noch einen merklichen Lichteindruck hervorzurufen. Bei α-Strahlenerregung kann also auch mit bloßem Auge unter den angeführten Bedingungen ein einzelner szintillatorischer Lichtblitz bemerkt werden, wenn der Wirkungsgrad hier dieselbe Größe hat wie der bei Kanalstrahlenerregung ermittelte.

Was den Vergleich des Wirkungsgrades von Kathoden- und Kanalstrahlen anlangt, so zeigt sich, daß schnelle Ka-

thodenstrahlen einen rund zehnmal größeren Bruchteil ihrer Energie in Phosphoreszenzlicht umsetzen als Kanalstrahlen.

Meinem hochverehrten Lehrer, Hrn. Geheimrat W. Wien, möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für sein dauerndes Interesse und die gütige Hilfe während derselben auf das wärmste danken.

Auch bin ich Hrn. Professor Dr. F. Harms, sowie Hrn. Privatdozent Dr. Rau für zahlreiche Ratschläge und häufigen Beistand zu großem Dank verpflichtet.

Lebenslauf.

Am 17./30. März 1888 wurde ich als Sohn des preußischen Staatsangehörigen Großkaufmanns Konrad Georg Leberecht Rüchardt und seiner Ehefrau Fanny geb. v. Wogau zu Moskau in Rußland geboren. Ich bin evangelisch-lutherischer Konfession. Unterrichtet wurde ich zu Hause und absolvierte nur die drei letzten Klassen am Vitzthumschen Gymnasium zu Dresden, das ich Ostern 1908 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Vom Herbst 1908 bis zum Frühjahr 1910 studierte ich in Jena Physik, Mathematik und Chemie. Meine Lehrer waren: Auerbach, Haussner, Knorr, Liebmann, Linck, Rau, Winkelmann. — Im Sommersemester 1910 studierte ich in Freiburg i. Br. Meine Lehrer waren: Gaede, Gattermann, Himstedt, Meyer, Reinganum, Riesenfeld. Seit Oktober 1910 bin ich in Würzburg immatrikuliert und habe meine Arbeit im physikalischen Institut der Universität unter der Leitung von Hrn. Geh. Hofrat W. Wien von Dezember 1911 bis Februar 1914 ausgeführt. Meine Lehrer in Würzburg waren: Cantor, Harms, Hilb, Rau, Rost, v. Weber, Wien.

Die mündliche Prüfung fand am 28. Mai 1914 statt.